Zur Analyse des Pneumotachogramms und deren Bedeutung für die Beurteilung der Atemmechanik

Inauguraldissertation
zur Erlangung der Würde eines Doctor medicinæ
der Universität Bern

vorgelegt von

DOMINIK WEIBEL
SCHENKON (Luzern)

Buchdruckerei Richème, Neuenburg

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546502_0095

Aus der medizinischen Universitäts-Klinik Bern
Direktor: Prof. Dr. W. Frey

Zur Analyse des Pneumotachogramms und deren Bedeutung für die Beurteilung der Atemmechanik

Meinem Vater gewidmet.

Zur Analyse des Pneumotachogramms und deren Bedeutung für die Beurteilung der Atemmechanik

Inauguraldissertation
zur Erlangung der Würde eines Doctor medicinæ
der Universität Bern

vorgelegt von

DOMINIK WEIBEL
SCHENKON (Luzern)

Buchdruckerei Richème, Neuenburg

Auf Antrag des Herrn Prof. Dr. W. Frey von der medizinischen Fakultät zum Druck als Dissertation genehmigt.

Bern, den 11. November 1942.

Der Dekan der Med. Fakultät :
Prof. Dr. A. von Muralt.

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Einleitung.

Das Pneumotachogramm nach Fleisch stellt bekanntlich die Geschwindigkeitskurve des inspiratorischen und expiratorischen Atemstromes dar. Aus seiner Form ergibt sich, dass die Geschwindigkeit während der ganzen Atemphase sich ändert. So sehen wir im Beginn jeder Atemphase stets ein Ansteigen, gegen das Ende hin ein Abfallen nach dem Nullpunkt. Es handelt sich somit um keine einfache Strombewegung im physikalischen Sinn, sondern um einen z. T. beschleunigten, z. T. verzögerten Bewegungsvorgang. Beschleunigung und Verzögerung sind aber im physikalischen Sinn nichts anderes als die Wirkung von Kraft und Gegenkraft bzw. Kräften und Gegenkräften auf irgend eine Masse, und es lag deshalb nahe, diesen physikalischen Gedankengang einmal auf den Atmungsvorgang zu übertragen. Durch Analyse des Pneumotachogramms ist man ja ohne weiteres in der Lage, die Beschleunigung und die Verzögerung des Atemstromes festzustellen, und diese Veränderungen lassen sich nur als die Folgen des sich am Atmungsapparat ablaufenden Kräftespiels deuten. Dabei kommen sowohl die muskulären wie die elastischen Kräfte von Thorax, Lunge und Zwerchfell in förderndem wie in hemmendem Sinne zur Geltung. Daraus ergibt sich aber eine derart vielseitige Beeinflussungsmöglichkeit des Atmungsvorgangs, dass es uns nicht verwundern darf, dass wir hierüber noch nichts Genaueres wissen.

Immerhin ist die muskuläre Aktion von Zwerchfell und Thorax sowohl inspiratorisch wie expiratorisch koordiniert. Ausserdem ist zu bedenken, dass sich die normale ruhige inspiratorische Erweiterung des Atmungsapparates aktiv unter der Wirkung der Inspirationsmuskulatur von Thorax und Zwerchfell vollzieht, während die normale Expiration zur Hauptsache passiv unter dem Einfluss der elastischen Kräfte von Lunge und Thorax erfolgt. Beschleunigungseffekte während der Inspiration sind somit muskulärer Genese, Verzögerungswirkungen stehen dagegen mit den elastischen Widerständen von Thorax und Lunge und den Strömungswider-

ständen in Zusammenhang. Allerdings müssen in dieser Atemphase auch aktive Muskelkräfte von Seiten der Expirationsmuskulatur in Betracht gezogen werden, weil jeder aktive Bewegungsvorgang (Willkürbewegung) sowohl unter dem Einfluss der Agonisten wie Antagonisten sich abwickelt. Während der normalen Expiration liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt, indem hier die elastischen Kräfte beschleunigend, der Tonus der Inspirationsmuskulatur und die Strömungswiderstände dagegen verzögernd wirken. Bei verstärkter Atmung sind die Verhältnisse natürlich komplizierter, weil nun auch in der ganzen Expirationsphase aktive Muskelkräfte am Werk sind.

Nach dem allem muss man annehmen, dass dem Ablauf der Atembewegung gewisse Gesetzmässigkeiten innewohnen, die sich nur durch die Analyse des Pneumotachogramms zu erkennen geben. Frühere Untersuchungen mit Hilfe der spirometrischen Atemvolumkurve haben allerdings gezeigt, dass von Atemzug zu Atemzug sehr grosse Schwankungen in Bezug auf das Verhalten der mittleren und maximalen Atemstromstärke bestehen, und dass selbst unter veränderten atemmechanischen Bedingungen (verschiedene Körperlagen) keine streng gesetzmässigen Veränderungen dieser Grössen beobachtet werden können. Es lassen sich höchstens gewisse Tendenzen eruieren. Die Atemvolumkurve eignet sich somit nicht zur genauen Analyse atemmechanischer Faktoren, und wir versuchten deshalb mit Hilfe des Pneumotachogramms uns hierüber einen genaueren Einblick zu verschaffen.

Unsere Untersuchungen umfassen die Analyse des Pneumotachogramms in vier verschiedenen Körperlagen; nämlich im Liegen, in der Rückenhängelage nach Coloban P., in der Bauchstützlage nach Rollier und im Sitzen. Diese Lagen waren früher schon mit der Atemvolumkurve untersucht worden. Unsere Untersuchungen erstreckten sich nicht nur auf das Pneumotachogramm der normalen ruhigen Atmung, sondern auch auf dasjenige der maximal verstärkten Atmung. Als Versuchspersonen dienten 8 Lungen- und Herzgesunde Patienten der Mediz. Klinik. Ueber die Einzelheiten der Auswertungsmethodik wird im folgenden Abschnitt berichtet.

Methodik.

Die Aufnahme des Pneumotachogramms wird als bekannt vorausgesetzt und wir wollen uns nur mit der Analyse des Pneumotachogramms befassen. Dies zerfällt :

1. in das Ausmessen des Pneumotachogramms;

2. in die graphische Darstellung der erhobenen Ergebnisse. (Geschwindigkeitsunterschiede).

Bekanntlich lässt sich der Pneumotachograph eichen, so dass aus dem Pneumotachogramm ohne weiteres die absoluten Geschwindigkeitswerte abgelesen werden können. Das Eichverfahren ist keineswegs einfach. Zudem kam es uns bei unsern Untersuchungen vielmehr auf den Verlauf der Geschwindigkeitskurve an als auf die absoluten Werte, weshalb wir auf diese Eichung verzichteten.

1. *Das Ausmessen des Pneumotachogramms.* Mit Hilfe eines Kreuztisches lassen sich alle Kurven genau analysieren. Wir haben zuerst auch mit diesem Verfahren gearbeitet. Dasselbe ist aber zeitraubend, und wir suchten deshalb nach einer Möglichkeit, das Ausmessen der Kurven abzukürzen. Dies gelang uns, indem wir ein durchsichtiges Millimeterpapier auf eine Glasplatte klebten, das Ganze auf die Kurve legten und mit Hilfe des so auf die Kurve projizierten Millimetermasstabes die Ablesungen vornahmen. In Abbildung 1 ist der Messvorgang dargestellt. Wir sehen durch das Pneumotachogramm eine Linie gezogen, die die sog. Nullpunkte miteinander verbinden und die diphasische Kurve in Inspiration (oberhalb) und Expiration (unterhalb) unterteilt. Unter den Nullpunkten haben wir den Beginn und das Ende jeder Atemphase zu verstehen, wobei natürlich der Beginn der Inspiration mit dem Ende der Expiration und das Ende der Inspiration mit dem Beginn der Expiration zusammenfällt. Es sind das die Punkte, in denen keine Bewegung stattfindet und dementsprechend die Geschwindigkeit auf null gesunken ist. Die Nullinie bedeutete für uns gleich-

Tab. 1.

Ausmessung der Pneumotachographen von Fall 1 im Liegen und Errechnung der Geschwindigkeitsdifferenzen

A. *Inspirium :*

Kurvenstand gemessen mit Kreuztisch					Geschwindigkeitsdifferenzen in mm.				
Kurve 1	Kurve 2	Kurve 3	Kurve 4	Kurve 5	Kurve 1	Kurve 2	Kurve 3	Kurve 4	Kurve 5
85,0	84,5	84,5	84,0	83,5	+ 2,2	+ 9,0	+ 7,5	+ 5,3	+ 6,9
82,8	75,5	77,0	84,0	76,6	—10,5	+ 2,7	+ 4,8	+ 4,2	+ 4,6
72,5	72,8	72,2	78,7	72,0	+ 1,2	+ 1,3	+ 0,4	+ 2,5	+ 1.0
71,3	71,5	71,8	74,5	71,0	+ 0,1	0,0	— 0,9	+ 1,0	0,0
71,2	71,5	72,7	72,0	71,0	— 0,1	— 1,2	+ 0,1	+ 0,6	— 0,3
71,3	72,7	72,6	71,0	71,3	— 0,5	— 1,5	— 0,9	— 2,8	— 4,4
71,8	74,2	72,5	70,4	75,7	— 2,0	— 2,8	— 2,5	— 7,3	— 7,8
73,8	77,0	75,0	73,2	83,5	— 6,2	— 3,5	— 7,3	— 3,5	
80,0	84,5	82,3	80,5		— 5,0		— 2,2		
85,0		84,5	84,0						

B. *Expirium :*

Kurvenstand gemessen mit Kreuztisch					Geschwindigkeitsdifferenze in mm.				
Kurve 1	Kurve 2	Kurve 3	Kurve 4	Kurve 5	Kurve 1	Kurve 2	Kurve 3	Kurve 4	Kurve 5
84,6	84,5	84,1	83,5	83,4	+ 6,4	+ 6,3	+ 5,3	+ 7,3	+ 9,7
91,0	90,8	89,4	90,8	93,2	+ 3,5	+ 1,9	+ 2,6	+ 1,9	+ 5.8
94,0	92,7	92,0	92,7	96,0	— 0,3	— 0,2	+ 0,5	+ 1,1	— 0,6
94,2	92,5	92,5	93,8	95,0	— 0,7	— 1,5	0,0	— 0,8	— 2,3
93,5	91,0	92,5	93,0	93,1	— 2,2	— 1,0	— 0,7	— 2,2	— 4,1
91,3	90,0	91,8	90,8	89,0	— 3,8	— 1,3	— 1,8	— 2,8	— 3,0
87,5	88,7	90,0	88,0	86,0	— 3,0	— 4,2	— 2,1	— 3,0	— 2,0
84,5	84,5	87,9	85,0	83,0			— 3,8	— 1,5	— 3,0
		84,1	83,5						

zeitig die Zeitachse, von der aus die Messung gemacht wurde. Die mit einem durchsichtigen Millimeterpapier überzogene Glasplatte wurde nun in der Weise auf die Kurve gelegt, dass eine Zentimeterlinie des Papiers auf die Zeitachse zu liegen kam. Von 2 Millimeter zu 2 Millimeter Zeitabstand (bei der maximalen Atmung von 1 Millimeter zu 1 Millimeter) wurde nun der Kurvenstand ermittelt und der Wert tabellarisch aufgezeichnet. Im Allgemeinen wurden fünf Einzelphasen für Inspiration und Expiration ausgemessen. In Tabelle 1 sind die aus Kurve 1 ermittelten Werte festgehalten. Da es sich beim Pneumotachogramm um eine Geschwindigkeitskurve handelt, so müssen die von Messung zu Messung auftretenden Differenzen als Beschleunigungs- oder Verzögerungswerte taxiert werden. Wir finden deshalb in Tabelle 1 neben den Werten für den Kurvenstand eine Kolonne, die die Geschwindigkeitsunterschiede angibt und die je nach Vorzeichen als Beschleunigung oder Verzögerung gewertet werden müssen.

2. *Graphische Darstellung der Geschwindigkeitsunterschiede (Beschleunigungs- oder Verzögerungswerte).* In Figur 2 sind die Beschleunigungs- und Verzögerungswerte des in Figur 1 dargestellten Pneumotachogramms wiedergegeben. Figur 2a entspricht der Inspiration, Figur 2b der Expiration. Die Nullinie entspricht

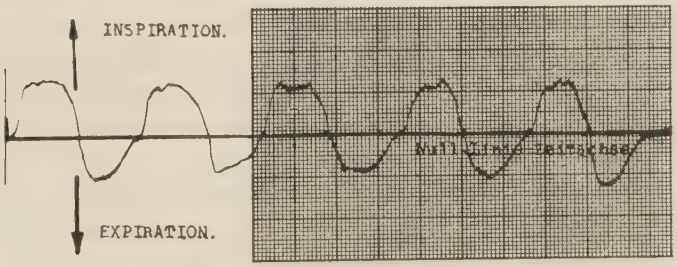


Fig. 1. – Ausmessung des Pneumotuchogramms mit durchsichtigem Millimeterpapier.

in beiden Fällen dem Scheitelpunkt des Pneumotachogramms d. h. jenem Punkt, an dem die Geschwindigkeit maximal ist (maximale Kurvenhöhe). Dieser Punkt stellt auch jenen Moment dar,

in dem der Atemstrom aus der beschleunigten in die verzögerte Phase übergeht. Was oberhalb dieser Nullinie ist bedeutet somit Beschleunigung, was unterhalb davon liegt entspricht der Verzögerung.

Ergebnisse.

I. Die Verhältnisse bei ruhiger Atmung.

In Figur 2-5 sind die Beschleunigungs- und Verzögerungswerte unserer bei Fall 1 durchgeführten Messungen graphisch dargestellt. Bei Figur 2a-5a handelt es sich um die Verhältnisse der Inspiration bei den verschiedenen Körperlagen, bei Figur 2b-5b um die entsprechenden expiratorischen Verhältnisse. In Figur 6a und 6b sind die Mittelwerte dieses Falls kurvenmässig zusammengestellt.

Wenn man die Fig. 2-5 betrachtet, so fällt einem die relativ grosse Variabilität der Kurven auf. In jeder Figur treffen wir verschiedene Maximalwerte für die Beschleunigung und die Verzögerung und ausserdem ist der ganze Verlauf der Kurven recht verschieden. Damit geht klar hervor, dass jeder Atemzug wieder etwas anders verläuft als der vorhergehende, und dass von einem streng gesetzmässigen Ablauf der Ein- oder Ausatmungsbewegung nicht die Rede sein kann. Diesen Eindruck erhielten wir schon früher bei der Bearbeitung der Atemvolumkurve. Der Beweis hiefür liess sich aber erst durch die vorliegenden Untersuchungen erbringen.

Vergleicht man aber die verschiedenen Figuren untereinander, so ergibt sich trotz der Variabilität der Einzelkurven für jede Körperlage im In- und Expirium ein mehr oder weniger charakteristisches Bild. Wir haben deshalb für jede Körperlage für das In- und Expirium die Mittelwerte errechnet und sie als Mittelwertskurve graphisch dargestellt. Damit wird der charakteristische

Tab. 2.

Das Verhalten der Kurvensteilheit bei verschiedenen Körperlagen.

Fälle	Expirium								Expirium							
	Beschleunigungsphase				Verzögerungsphase				Beschleunigungsphase				Verzögerungsphase			
	L	H	R	S	L	H	R	S	L	H	R	S	L	H	R	S
4	3	4	2	1	4	3	1	2	4	3	1	2	3	4	2	1
2	4	3	2	1	4	3	1	2	3	5	1	2	4	3	1	2
3	4	2	1	3	4	2	1	3	4	2	1	3	4	3	1	2
4	1	2	4	3	3	1	4	2	4	1	3	2	4	3	2	1
5	1	2	3	4	1	3	2	4	3	4	1	2	4	3	1	2
6	3	4	1	3	1	2	3	4	1	3	2	4	4	3	1	2
7	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	1	3	2
8	4	3	2	1	3	4	2	1	4	3	1	2	1	2	3	4

L = Liegen. H = Hängelage. R = Rollierlage. S = Sitzen.
1 = grösste Kurvensteilheit.
4 = die geringste Kurvensteilheit.

Tab. 3.

Das Verhalten der maximalen Beschleunigung und Verzögerung bei den verschiedenen Körperlagen.

Fälle	Inspirium								Inspirium							
	Beschleunigungsphase				Verzögerungsphase				Beschleunigungsphase				Verzögerungsphase			
	L	H	R	S	L	H	R	S	L	H	R	S	L	H	R	S
1	3	4	2	1	4	3	1	2	4	3	1	2	3	4	1	2
2	4	3	2	1	2	4	1	2	3	4	1	2	4	3	1	2
3	4	2	1	3	4	2	1	3	4	2	1	3	4	3	1	2
4	1	2	4	3	3	1	4	2	1	2	4	3	2	3	4	1
5	1	3	2	4	1	3	2	4	3	4	1	2	3	4	1	2
6	3	4	1	2	3	4	1	2	1	4	2	3	2	4	1	3
7	4	3	1	2	4	3	1	2	4	3	1	2	2	1	3	4
8	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	1	2

L = Liegen. H = Hängelage. R = Rollierlage. S = Sitzen.
1 = grösstes Beschleunigungsmaximum
4 = kleinstes Beschleunigungsmaximum (Verzögerungsmax.)

Verlauf aus den betreffenden Figuren zur Darstellung gebracht. Auf diese Weise waren wir auch in der Lage, die so erhaltenen « Lagekurven » in Fig. 6a und 6b zusammenzustellen, um den Lageeinfluss besser studieren zu können. Ueber die Lagewirkung soll aber erst im Zusammenhang mit den Mittelwertskurven der übrigen Fälle gesprochen werden.

Bei der genauen Betrachtung der Fig. 2-5 fällt einem der häufig recht zackige Verlauf der Einzelkurven auf. Dies gilt sowohl für die Inspirations- wie die Expirationskurven, und diese Erscheinung findet sich bei allen Körperlagen wieder. Bei den Expirationskurven fällt die Zackung ausschliesslich in den verzögerten Teil dieser Atemphase, bei den Inspirationskurven findet sie sich über die ganze Atemphase verteilt. Diese Erscheinung beruht ganz sicher auf dem fördernden und hemmenden Spiel der Atmungskräfte, das nach Fleisch durch den propriozeptiven Reflexapparat dirigiert wird. In der Diskussion werden wir auf dieses Faktum noch näher eingehen müssen.

Bei den Fällen 2-8 handelt es sich um ganz ähnliche Verhältnisse. Auch hier besteht eine ziemlich grosse Variabilität der Einzelkurven, sowohl hinsichtlich der maximalen Beschleunigungs- und Verzögerungswerte, als auch der Verlaufsform der Kurven, bei Vorhandensein eines mehr oder weniger hervorstechenden « Lagebildes ». Auch die beschriebene Zackung kommt durchwegs vor, wenn auch in mehr oder weniger starkem Ausmass. Wir verzichten deshalb auf die Widergabe aller Einzelkurven und beschränken uns auf die graphische Darstellung der Mittelwertskurven (Fig. 6-17). Daraus muss sich schliesslich auch ergeben, ob sich lagetypische Veränderungen im Ablauf des Pneumotachogramms herausschälen lassen.

Wenn man nun die Mittelwertskurven der Fälle 1-8 sowohl für die Inspiration wie für die Expiration betrachtet, so ergeben sich in doppelter Hinsicht allgemein gültige Eigenschaften. So sehen wir, dass sämtliche Kurven in ihrem Beginn die maximalen Beschleunigungswerte aufweisen, während gegen das Ende hin, die maximalen Verzögerungswerte auftreten. Dies gilt nicht nur für die Mittelwertskurven, sondern auch für alle Einzelkurven und muss als allgemeine Eigenschaft dieser Beschleunigungs-Verzögerungs-

kurven gewertet werden. In zweiter Linie fällt der typische Unterschied im Verlauf der Inspirations- und Expirationskurven auf. Die Inspirationskurven sind steil und enden in der grossen Mehrzahl der Fälle mit einer nach rechts unten ziehenden Geraden. Die Expirationskurven verlaufen demgegenüber fast konkav, indem sie mit einer fast horizontalen oder sogar nach rechts oben ziehenden Geraden aufhören.

Vergleicht man nun die Inspirations- und Expirationsmittelwertskurven gesondert, so fällt der verschiedene Verlaufstypus bei den einzelnen Versuchspersonen (Fälle 1-8) auf. Derselbe ist für die betreffende Versuchsperson charakteristisch; denn er findet sich bei allen Körperlagen wieder. So treffen wir in den Fällen 2, 6 und 7 sowohl im Inspirium wie im Expirium einen äusserst steilen und kurzen Kurvenverlauf an, während bei Fall 1 der Verlauf gerade gegenteilig ist. Zwischen diesen Extremen halten sich die Fälle 4 und 8, die in ihrer Kurvenform mehr den Fällen 2, 6 und 7 gleichen und die Fälle 3 und 5, die dem Fall 1 mehr ähnlich sind. Auffällig ist dabei die allgemeine Uebereinstimmung von Inspirium und Expirium, sowohl hinsichtlich der Steilheit und der Dauer, obschon der spezifische Charakter der Expirationskurven dabei gewahrt bleibt.

Der Vergleich der Mittelwertskurven gibt uns schliesslich Auskunft über die Frage, ob die bei unsern Versuchen angewandten Körperlagen typische Veränderungen der pneumotachographischen Beschleunigungs-Verzögerungs-Kurve ergeben. Dies kann schon bei oberflächlicher Betrachtung verneint werden. Das genaue Verhalten ist in Tabelle 2 festgelegt und hieraus ergibt sich ebenfalls die Feststellung des recht uneinheitlichen Verhaltens vor allem für das Inspirium. Es lassen sich höchstens im Expirium Tendenzen nachweisen. So bilden die gewöhnliche liegende Position und die Hängelage einerseits und die Rollierlage und das Sitzen andererseits zwei Gruppen, die sich gegensätzlich verhalten. Die am steilsten abfallenden Kurven treffen wir durchwegs im Sitzen und in der Rollierlage an, die flachsten in der andern Gruppe. Dies gilt sowohl für den beschleunigten wie für den verzögerten Kurventeil und bedeutet nichts anderes, als dass die ganze Atemphase durch eine gewisse Tendenz charakterisiert ist. Dies gibt sich sogar in der

uneinheitlichen Gruppe der Inspirationskurven zu erkennen, indem dort bei 3/4 der Fälle der beschleunigte und der verzögerte Kurventeil in der Reihenfolge der Steilheit miteinander übereinstimmen.

Tabelle 3 gibt schliesslich noch Aufschluss über das Verhalten der maximalen Beschleunigungs- und Verzögerungswerte. Auffälligerweise verhalten sich dieselben genau gleich wie die Steilheit der Kurven, indem bei den steilsten Kurven (vergl. Tabelle 2) auch die grössten Beschleunigungs- und Verzögerungswerte, bei den flachen Kurven dagegen die kleinsten gefunden werden. Dementsprechend finden sich die Maxima und die Minima bei den Expirationskurven gruppenweise angeordnet. Liege- und Hängelage sind durch kleine, Rollierlage und Sitzen durch grosse Werte ausgezeichnet. Bei den Inspirationskurven fehlt irgendwelche sichere Gesetzmässigkeit in der Verteilung der Maxima und Minima auf die verschiedenen Körperlagen. Dafür sehen wir auch hier die Uebereinstimmung zwischen dem Ausmass der Kurvensteilheit und der Grösse der maximalen Beschleunigungs- und Verzögerungswerte. Das Zusammengehen dieser beiden Kurveneigenschaften entspricht offenbar einer dem ruhigen Atmungsvorgang innewohnenden Gesetzmässigkeit, da sich diese Tatsache selbst dort nachweisen lässt (Tabelle 2), wo im übrigen recht uneinheitliche Verhältnisse vorliegen.

Allerdings haben wir diese Gesetzmässigkeit an Mittelwertskurven gefunden, und es fragt sich, ob dies auch für die Einzelkurve zutrifft. Bei der Durchsicht von Fig. 2-5 muss man dies unbedingt bejahen und die nicht reproduzierten Einzelkurven der Fälle 2-8 verhalten sich entsprechend. Man ist deshalb ohne weiteres befugt, das Zusammengehen von Kurvensteilheit und Maximalausschlag als Gesetz des Ablaufs der ruhigen Atembewegung zu erklären.

Die bisherigen Ergebnisse lassen sich folgendermassen zusammenfassen :

1. Es besteht eine grosse Variabilität der Einzelkurven, sowohl hinsichtlich des maximalen Beschleunigungswertes als auch der Kurvensteilheit. Dies tritt vor allem in den inspiratorischen, weniger ausgesprochen in den expiratorischen Beschleunigungs-Verzögerungskurven in Erscheinung.

2. Die Aenderung des Körperlage führt zur Verschiebung des Kurvenbildes und zur Entstehung eines « Lagebildes », das durch eine Mittelwertskurve dargestellt wird.

3. Der Kurvenverlauf weist durchwegs eine auffällige Zackung auf, die sich im Inspirium auf die ganze Atemphase erstreckt, im Expirium nur auf den verzögerten Kurventeil.

4. Neben diesen variablen Faktoren bestehen aber im Ablauf der Kurven bestimmte Gesetzmässigkeiten. So sehen wir stets am Beginn die maximalen Beschleunigungswerte, gegen das Ende hin die maximale Verzögerung.

5. Eine weitere allgemeine Kurveneigenschaft gibt sich in dem prinzipiellen Unterschied zwischen dem Verlauf der inspiratorischen und expiratorischen Beschleunigungs-Verzögerungskurven zu erkennen. Die inspiratorischen Kurven sind steil und fallen von links oben nach rechts unten ab, die expiratorischen gehen nach steilem Abfall in eine konkave Abrundung über.

6. Beim Vergleich der Mittelwertskurven der verschiedenen Versuchspersonen lassen sich gewisse Kurventypen voneinander unterscheiden. Es gibt sowohl steile wie flacher verlaufende Typen, nebst Zwischenform. Dieser Verlaufscharakter ist individuell und für eine bestimmte Versuchsperson charakteristisch. So ist er bei den verschiedenen Körperlagen immer wieder zu erkennen. Auffällig ist dabei, dass Inspirium und Expirium in den allermeisten Fällen hinsichtlich Kurvensteilheit gut übereinstimmen, trotzdem die spezifische inspiratorische und expiratorische Kurvenform dabei gewahrt bleibt.

7. Der Lageeinfluss macht sich nur während der Expiration bis zu einem gewissen Grad gesetzmässig bemerkbar. So lassen sich hier zwei Gruppen unterscheiden, nämlich die Rollierlage und das Sitzen mit steilen Kurven und grossen Beschleunigungsmaxima, und auf der andern Seite die Hängelage und das gewöhnliche Liegen mit flacherem Kurvenverlauf und kleineren Beschleunigungsmaxima. (Tab. 2 und 3.) Auf die inspiratorischen Kurven wirkt sich der Lageeinfluss nicht gesetzmässig aus. Es kommt hier höchstens zu einer für das betreffende Individuum charakteristischen Verschiebung des Kurvenverlaufs.

8. Aus Punkt 7 ergibt sich schon, dass Kurvensteilheit und Grösse der maximalen Beschleunigung zusammengehen. Dies lässt sich bei allen Mittelwertskurven und nahezu bei allen Einzelkurven beobachten, sodass man vom Bestehen einer allgemeinen Gesetzmässigkeit sprechen kann.

II. Die Verhältnisse bei maximaler Atmung.

Diese Pneumotachogramme sind prinzipiell in gleicher Weise wie bei der ruhigen Atmung analysiert und ausgewirkt worden. Einzig der Zeitabstand betrug wegen der grossen Ausschläge nur 1 mm. Da es sich ja nur um vergleichende Untersuchungen handelt, spielt dieser Unterschied im Zeitabstand keine Rolle. Die so erhaltenen Beschleunigungs- und Verzögerungswerte sind als Mittelwertskurven in den Fig. 14-17 dargestellt. Dabei zeigte sich eine noch viel grössere Variabilität der maximalen Beschleunigungs-Verzögerungswerte sowie des Kurvenverlaufs. Ein Einfluss der Körperlage liess sich hier nicht mehr erkennen und die Zackung der Kurven erlangte ein ausserordentliches Ausmass. Nicht nur während der ganzen Inspiration sondern auch während der ganzen Expiration (im Gegensatz zu den Verhältnissen bei der ruhigen Atmung) machte sie sich geltend als Ausdruck dafür, dass das Kräftespiel von Agonisten und Antagonisten unter dem verstärkten Willküreinfluss der maximalen Atmung deutlicher zutage tritt. Die allgemeine Form gleicht hingegen prinzipiell derjenigen der Ruheatmung, indem die Grössenwerte für die Beschleunigung an den Anfang und die grössten Verzögerungswerte gegen das Ende jeder Atemphase zu liegen kommen. Ferner stiess man auch hier wieder auf den prinzipiellen Unterschied im Verlauf der Inspirations- und Expirationskurve, indem die Kurven des maximalen Inspiriums steil verliefen, diejenigen des maximalen Expiriums das gleiche abgerundete Ende wie beim normalen Expirium aufwiesen. Die Unterscheidung in steilere und flachere Kurventypen lässt sich auch hier durchführen, wobei wieder eine gewisse Uebereinstimmung

zwischen dem Kurvenverlauf der entsprechenden Inspirations- und Expirationskurven konstatiert werden kann.

Ein Lageeinfluss hinsichtlich der Kurvensteilheit und der Beschleunigungsmaxima liess sich nicht nachweisen, ebensowenig eine sichere Beziehung zwischen dem Ausmass der Kurvensteilheit und den maximalen Beschleunigungs- bzw. Verzögerungswerten.

Die ruhige und die maximale Atmung weisen somit im Ablauf des Pneumotachogramms gewisse gemeinsame Merkmale auf. Diese bestehen einmal in der grossen Variabilität der Einzelkurven und in der Zackung der Kurven. Beide Merkmale sind bei der maximalen Atmung wesentlich stärker ausgeprägt. Umsomehr überrascht die im Prinzip gleiche Kurvenform, sowohl für das Inspirium wie das Expirium. Allerdings bestehen auch hier gewisse unterschiedliche Typen, vor allem was die Kurvensteilheit anbetrifft.

Das Fehlen eines Lageeinflusses und der gesetzmässigen Beziehung zwischen Kurvensteilheit und den maximalen Beschleunigungs- und Verzögerungswerten unterscheidet dagegen klar die maximale von der ruhigen Atmung.

Diskussion.

Die Ursache für den zackigen Verlauf der Kurven haben wir schon erwähnt. Es kann sich nur um den Einfluss der reflektorischen Steuerung des Atmungsvorgangs handeln. Diese Regulation tritt ja bei jedem Bewegungsvorgang in Erscheinung, und der Fleisch'sche Pneumotachograph ermöglicht es nur, am Verhalten des Atemstromes dieses Kräftespiel zu erfassen. Die Tatsache, dass die Kurven der maximalen Atmung eine stärkere Zackung aufweisen als diejenige der ruhigen Atmung, spricht ganz in diesem Sinn; denn diese reflektorische Regulation muss bei stärkern muskulären Bewegungen auch deutlicher in Erscheinung treten.

Die grosse Variabilität der Einzelkurven geht sicher zum grossen Teil auf Kosten dieser Erscheinung. Andererseits muss aber

an das Vorhandensein eines verschieden grossen Atemimpulses bei den Inspirationskurven gedacht werden. Die Einzelkurven (Fig. 2-8) zeigen sogar bei ein- und denselben atemmechanischen Bedingungen (gleiche Körperlage) verschiedene maximale Beschleunigungswerte, was im Inspirium nur mit einer verschieden starken Innervation der Einatmungsmuskulatur durch das Atemzentrum erklärt werden. Dies ergibt sich nämlich schon aus dem allgemeinen Verhalten der Atemvolumkurve bis zu einem gewissen Grad zu erkennen, indem hier von Atemzug zu Atemzug kleinere oder grössere Differenzen des Atemvolumens auftreten.

Schwieriger erscheint die Erklärung der allgemeinen Form des Inspiriums und des Expiriums. Sie wird uns aber klar, wenn man sich die Grundlagen der mechanischen Bewegungslehre in Erinnerung ruft. Eine Bewegung verläuft im physikalischen Sinn gleichmässig beschleunigt, wenn sich eine Kraft ungehindert auswirken kann. Dies ist jedoch nur theoretisch möglich, weil jeder Bewegung Gegenkräfte (Reibung, Luftwiderstand, etc.) erwachsen. Diese führen zu einer progressiven Abnahme der Beschleunigung bis zum Wert null, sodass die Bewegung nun gleichmässig verläuft: Kraft und Gegenkraft halten sich dann das Gleichgewicht. Bei der Atembewegung sind die Verhältnisse noch komplizierter, so wird während der Inspiration der inspiratorische Bewegungsimpuls immer kleiner, während der inspiratorische Widerstand (Retraktionskraft der Lungen, elastischer Widerstand des Thorax) mit wachsender Erweiterung des Thorax linear anwächst. Daneben spielen allerdings noch Strömungswiderstände eine grosse Rolle, die mit wachsender Geschwindigkeit des Atemstroms sogar quadratisch sich vergrössern. Es kann sich somit kein Gleichgewichtszustand zwischen der Inspirationskraft und dem Inspirationswiderstand einstellen, und die vorerst beschleunigte Bewegung muss nach vollständiger Abnahme der Beschleunigung in einen zunehmend verzögerten Bewegungsvorgang übergehen. Die allgemeine steil abfallende Richtung (die höchstens durch die noch zu besprechende Zackung unterbrochen ist) unserer inspiratorischen Beschleunigungs-Verzögerungskurven findet damit ihre Erklärung.

Die expiratorische Beschleunigungs-Verzögerungskurve kann

nicht genau gleich erklärt werden; denn es handelt sich ja bei dieser Atemphase mehr um ein passives Zurückschnellen des Thorax und der Lunge in eine Gleichgewichtslage (Atemruhelage). Die elastischen Kräfte von Lunge und Thorax sind dabei gerade am Beginn der expiratorischen Atemphase am grössten und ersetzen hier den bei der Inspiration vorhandenen willkürlichen Atemimpuls. Die erwähnten elastischen Kräfte werden nun mit fortschreitender Expiration kleiner, und gegen das Ende dieser Atemphase muss sogar ein gewisser thorakaler Widerstand überwunden werden, weil der Thorax infolge der Retraktionskraft der Lunge unter seine eigentliche Atemruhelage sich einstellen muss. Ein schlagender Beweis hiefür ergibt sich jedesmal beim Anlegen eines einseitigen Pneumothorax, bei dem sich die entsprechende Thoraxpartie momentan erweitert, d. h. infolge der plötzlich aufgehobenen Einwirkung der pulmonalen Retraktionskraft eine neue Gleichgewichtslage einnimmt. Aus all diesen Gründen müsste eigentlich der Verlauf der Expirationskurve derjenigen der Inspiration entsprechen. Wenn das nun nicht der Fall ist, beruht dies offenbar auf dem Einsetzen muskulärer expiratorischer Kräfte im Moment, in dem die elastischen Expirationskräfte sich beinahe erschöpft haben. Auf diese Weise liesse sich das abgerundete Ende der Expirationskurven zwangslos erklären. Ausserdem würde die erst im verzögerten Teil der normalen Expirationskurve in Erscheinung tretende Zackung sehr gut hieher passen, weil sich das reflektorische Spiel von Agonisten und Antagonisten einer Bewegung erst dann bemerkbar machen kann, wenn aktive Kräfte überhaupt dabei sind. Bei der maximalen Expiration sind wohl von Anfang an muskuläre Kräfte am Werk: diese müssen aber im Bereich der Reserveluft (also gegen das Ende der maximalen Expiration) am grössten sein, weil hier gegen den Thoraxwiderstand ausgeatmet wird. Die Abrundung der Beschleunigungs-Verzögerungskurve findet somit auch hier durch das Einsetzen verstärkter muskulärer Expirationskräfte ihre Erklärung. Wenn nun bei der maximalen Expiration die Kurvenzackung sich über die ganze Atemphase erstreckt, so ist dies auch nur der Ausdruck dafür, dass expiratorische Muskelkräfte unter diesen Bedingungen von Anfang an mitbeteiligt sind.

Das Fehlen eines gesetzmässigen Lageeinflusses auf den Ablauf des Pneumotachogramms ist eine überraschende Tatsache, weil andere Atmungsgrössen wie Vitalkapazität und Atemruhelage (die allerdings mehr von statischen Veränderungen des Thorax und Zwerchfells abhängig sind) sich stark verändern unter diesen Bedingungen. Es geht daraus ganz allgemein hervor, dass der Atmungsapparat sich statisch gesetzmässig an veränderte atemmechanische Bedingungen anpassen kann, dass aber dies auf die Dynamik der Atembewegung keine einheitliche Wirkung zu haben braucht. Grund hiefür ist wohl die individuelle Reaktion des Atemzentrums der verschiedenen Versuchspersonen auf eine bestimmte atemmechanische Situation. Neben dem den Bewegungsimpuls regulierenden Atemzentrum spielt noch der propriozeptive Reflexapparat eine grosse Rolle für den Ablauf der Atembewegung, so dass es unter diesen Gesichtspunkten fast nicht zu verstehen wäre, wenn eine gesetzmässige Beeinflussung des Atmungsvorgangs durch Lageänderung sich einstellte. Die Expiration bei normaler ruhiger Atmung bildet allerdings eine gewisse Ausnahme, indem sich hier wenigstens zwei Gruppen (Sitzen und Rollierlage einerseits, Liegen und Hängelage andererseits) voneinander unterscheiden lassen. Dies steht jedoch nicht im Gegensatz zu dem eben Gesagten. Die ruhige Expiration stellt, wie wir gesehen haben, eine mehr passive Atembewegung dar, in der aktive Muskelkräfte und propriozeptive Regulationsmechanismen erst gegen das Ende hin zur Auswirkung gelangen. Wenn irgendwann, so muss sich der Lageeinfluss gerade hier dynamisch auswirken.

Die merkwürdige Beziehung zwischen den maximalen Beschleunigungs- und Verzögerungswerten und der Steilheit der Kurven bei der normalen ruhigen Atembewegung hat auch ihren innern Grund. Grosse Bewegungsimpulse führen zum Auftreten von grossen Beschleunigungswerten im Inspirium. Damit entstehen aber gleichzeitig auch grosse Gegenkräfte auf Grund der elastischen Eigenschaften von Thorax und Lunge einerseits und infolge des mit der Geschwindigkeit des Atemstroms quadratisch anwachsenden Strömungswiderstands andrerseits. Die Bewegungsenergie muss sich unter diesen Bedingungen rasch erschöpfen und der Kurvenabfall

wird dadurch steil. Ist der initiale Beschleunigungswert kleiner. so machen sich die elastischen Widerstände und vor allem der Strömungswiderstand weniger stark geltend und die Kurve kann flacher verlaufen.

Es fragt sich nun, wie die individuellen Kurventypen (steil und flach) erklärt werden sollen. Handelt es sich dabei um die Auswirkung eines individuellen Innervationsmechanismus von Seiten des Atemzentrums, der ja die Grösse des initialen Beschleunigungswertes im Inspirium bestimmt und damit den weitern Verlauf der Kurve bedingt, oder sind es die konstitutionellen Widerstandsverhältnisse von Thorax, Zwerchfell. Lunge und Bronchialsystem, die sich hier manifestieren ? Diese beiden Fragen können wir nicht beantworten. Dies wäre wahrscheinlich erst möglich, wenn gleichzeitig bei gleichen Versuchspersonen sämtliche atemmechanische Verhältnisse untersucht würden (Vitalkapazität, Residualluft, Atemgrenzwert, etc.).

Als auffällig erscheint die Tatsache, dass diese Beziehungen zwischen den maximalen Beschleunigungs- und Verzögerungswerten und der Kurvensteilheit nicht nur für das Inspirium sondern auch für das Exspirium gilt. Hier wirken sich ja die elastischen Kräfte von Lunge und Thorax fördernd auf die Atembewegung aus und in hemmendem Sinn macht sich nur der Strömungswiderstand geltend. Dies beweist die überragende Rolle des Strömungswiderstands bei dieser passiven Selbstregulation des Verlaufs der Atembewegung. Dadurch wird trotz des wechselnden initialen Bewegungsimpulses (wechselnde Grösse der initialen Beschleunigung) ermöglicht, dass die maximalen Geschwindigkeiten des Pneumotachogramms (Scheitelpunkte) von Atemzug zu Atemzug nicht erheblich voneinander abweichen, und dass aus dem gleichen Grund bei normaler ruhiger Atmung ein relativ konstantes Atemvolumen zustande kommt. Diese Untersuchungen zeigen dann weiter, dass einer mehr oder weniger regelmässigen spirometrischen Atemvolumkurve nicht ohne weiteres ein einheitlicher Bewegungsmechanismus zu Grunde liegt. Die spirometrische Kurve ist eben das Endprodukt komplizierter Vorgänge, die sich erst bei der genauen Analyse des Pneumotachogramms offenbaren. Der vom Atemzentrum ausgehende nervöse Bewegungsimpuls, die elastischen Widerstände von Thorax und Lunge,

der Strömungswiderstand in den Luftwegen und die Tätigkeit des propriozeptiven Reflexapparates stellen Faktoren dar, die einander beim Atmungsvorgang beeinflussen. Dabei gelangen die elastischen Kräfte von Thorax und Lunge nur während der normalen Expiration sichtbar zur Auswirkung, während sie sonst durch die andern genannten Faktoren überdeckt werden. Dies ist auch der Grund, warum die verschiedenen Körperlagen in dynamischer Hinsicht nicht gesetzmässig auf das Pneumotachogramm einzuwirken vermögen. Sie stellen wohl verschiedene atemmechanische Bedingungen dar; sie beeinflussen jedoch nur die Beweglichkeit von Thorax und Zwerchfell, d. h. die elastischen Wiederstände von Thorax und Zwerchfell. Da nun gerade diese Grössen weniger entscheidend in den Ablauf des Pneumotachogramms eingreifen, so können sich diese veränderten atemmechanischen Bedingungen auch nicht gesetzmässig auswirken. Sie führen wohl bei den verschiedenen Versuchspersonen zu einem mehr oder weniger ausgesprochenen « Lagebild », das jedoch ganz individuellen Charakter aufweist. Die mit den genannten Körperlagen verbundenen atemmechanischen Bedingungen finden somit ihre individuelle Beantwortung.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich die Schlussfolgerung, dass sich nur solche Umstände dynamisch auf das Pneumotachogramm auswirken, die den Innervationsmechanismus oder den Strömungswiderstand beeinflussen. Durch weitere Untersuchungen bei geeigneten klinischen Fällen, wie bei Lähmungen der Atmungsmuskulatur oder Asthmapatienten liesse sich die Richtigkeit dieses Satzes ohne weiteres nachprüfen.

Zusammenfassung.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Analyse des Verlaufs des Pneumotachogramms. Dieses stellt bekanntlich die Geschwindigkeitskurve des inspiratorischen und expiratorischen Atemstromes dar, und daraus lässt sich durch systematische Ermittlung

des Kurvenstandes die Beschleunigung bzw. die Verzögerung in jedem Kurvenabschnitt errechnen. Die absoluten Werte spielen bei unserer Betrachtung keine Rolle, weil wir nur Pneumotachogramme, die unter entsprechenden Verhältnissen aufgenommen worden sind, miteinander vergleichen. Die schwierige Eichung des Pneumotachographen konnte aus diesem Grunde unterbleiben. Die bei der Ausmessung der Pneumotachogramme erhaltenen Geschwindigkeitsdifferenzen wurden dann auf Millimeterpapier im Massstab 1 : 10 graphisch dargestellt und auf diese Weise entstanden die Beschleunigungs-Verzögerungskurven.

Beschleunigungs- und Verzögerungswirkungen beruhen immer auf dem Einfluss von Kräften und Gegenkräften. Da nun beim Atmungsvorgang das Kräftespiel zwischen fördernden und hemmenden Kräften vielfältig und schwer übersehbar ist, hofften wir durch die genaue Analyse des Pneumotachogramms in dieser Beziehung weiter zu kommen. Die Untersuchungen sollten auch die Fortsetzung zu frühern Versuchen von Gukelberger und Kohler bilden, bei denen mit Hilfe von spirometrischen Versuchen die Beeinflussung der Atmung durch die Aenderung der Körperlage studiert worden war. Aus diesem Grunde wurde der Lageeinfluss wieder in unsere Unteri suchungen einbezogen. Die Ergebnisse lassen sich nun in zwei Abschnitte gliedern.

1. *Die allgemeinen Eigenschaften der Beschleunigungs-Verzögerungskurven.*

a) Inspiration und Expiration sind durche 2 besondere Kurventypen gekennzeichnet. Die inspiratorische Beschleunigungs-Verzögerungskurve verläuft in ziemlich steilem Abfall von rechts oben nach links unten, wobei die maximalen Beschleunigungswerte am Anfang die maximalen Verzögerungswerte gegen das Kurvenende hin zu finden sind. Die expiratorische Kurve beginnt ähnlich wie die inspiratorische, geht aber im verzögerten Abschnitt in eine konkave abgerundete Linie über. Dabei liegen die maximalen Beschleunigungen wieder am Kurvenanfang, die maximalen Verzögerungen vor dem abgerundeten Kurvenabschnitt.

b) Diesen sich immer wiederkehrenden Kurvenformen ist eine

weitere Kurvenveränderung aufgepfropft, nämlich eine mehr oder weniger starke Zackung. Dieselbe erstreckt sich auf das ganze normale Inspirium und auf das abgerundete Ende des normalen Expiriums. Bei der maximalen Atmung sind die Verhältnisse nur insofern verändert, als hier auch während des ganzen Expiriums diese Zackung zu erkennen ist.

c) Bei gleicher Versuchsperson und gleichen atemmechanischen Bedingungen ergibt sich eine auffallende Variabilität der Einzelkurven, sowohl hinsichtlich der maximalen Beschleunigungs- und Verzögerungswerte als auch hinsichtlich der Kurvensteilheit. Von einem eindeutig fixierten Ablauf der Atembewegung kann somit nicht die Rede sein.

d) Trotzdem lässt sich für jede Versuchsperson ein gewisser Kurventypus feststellen, der bei allen Einzelkurven zum Ausdruck kommt. Die verschiedenen Einzelkurven bei einer bestimmten Körperlage lassen sich deshalb durch eine Mittelwertskurve darstellen, die das charakteristische des Kurvenverlaufs der Einzelkurven wiedergibt. Es gibt steile und flache Verlaufsformen nebst Zwischenformen. Dieser individuelle Kurventypus erhält sich sogar bei Aenderung der Körperlage. Die dadurch bedingte Verschiebung des Kurvenverlaufs ist somit nicht so stark, dass dadurch der individuelle Kurventypus verloren geht.

e) Als interessante Tatsache ist die gesetzmässige Beziehung zwischen dem maximalen Beschleunigungswert der Kurvensteilheit und dem maximalen Verzögerungswert zu nennen. Je grösser die initiale maximale Beschleunigung ausfällt, umso steiler ist der Kurvenabfall. und umso grösser die maximale Verzögerung. Diese Beziehung gilt vor allem bei der normalen ruhigen Atmung, sowohl für die Inspiration wie für die Expiration, während dies bei der maximalen Atmung höchstens für gewisse Teilstrecken der Kurve zuzutreffen scheint.

f) Ein gesetzmässiger Einfluss von Seiten der verschiedenen Körperlagen kann nur bei der normalen Expiration beobachtet werden. Hier finden sich beim Sitzen und der Rollierlage ein steiler Kurvenverlauf, bei grossen Beschleunigungs- und Verzögerungs-

maxima vor, während das Liegen und die Hängelage durch einen flachen Kurvenverlauf und niedrige Beschleunigungs- und Verzögerungsmaxima gekennzeichnet sind. Bei den übrigen Atemphasen (normale Inspiration, maximale In- und Expiration) wirkt sich der Lageeinfluss wohl in einer Veränderung des Kurvenverlaufs aus, die jedoch rein individuellen Charakter aufweist und jede Gesetzmässigkeit vermissen lässt.

Aus den angegebenen Punkten lassen sich nun die Schlussfolgerung für die Atemdynamik ableiten.

2. *Die Dynamik der Atembewegung.*

a) Der vom Atemzentrum ausgehende nervöse Impuls schwankt in seiner Grösse und bewirkt infolgedessen bei der normalen ruhigen Atmung ganz verschieden grosse initiale Beschleunigungswerte. Diese beschleunigte inspiratorische Bewegung erfolgt jedoch gegen die linear anwachsenden elastischen Widerstände von Thorax und Lunge und gegen die mit der Atemstromgeschwindigkeit quadratisch grösser werdenden Strömungswiderstände. Unter diesen Umständen, vor allem unter dem Einfluss des Strömungswiderstands, erfolgt die Behinderung der Inspirationsbewegung, die sich in unsern graphischen Beschleunigungs-Verzögerungskurven in einem mehr oder weniger raschen Abfall des Beschleunigungswertes auf null und dem Auftreten von zunehmenden Verzögerungswerten kundgibt. Die Bewegung erlischt, nachdem ein maximaler Verzögerungswert erreicht worden ist.

b) Die expiratorische Verengerung der Atemwege erfolgt bei ruhiger Atmung im Beginn ausschliesslich durch die inspiratorisch geweckten elastischen Kräfte. Lunge und Thorax streben damit ihrem Gleichgewichtszustand, der Atemruhelage, zu. Auch hier macht sich der Strömungswiderstand sofort geltend, indem auf den initialen maximalen Beschleunigungswert sofort ein Abfallen der Beschleunigungskurve auf null eine zunehmende Verzögerung der Bewegung sich einstellt. Mit fortschreitender Expiration werden aber die elastischen Kräfte von Thorax und Lunge immer kleiner, sodass sie wahrscheinlich nicht ausreichen würden, um in angemessener Zeit die Expirationsbewegung zu Ende zu führen. Es

kommt deshalb zum Einsatz von aktiv muskulären Kräften, unter deren Einwirkung die Bewegung rascher beendigt wird. Dies gibt sich in der expiratorischen Beschleunigungs-Verzögerungskurve durch die konkave Abrundung des Kurvenendes ohne weiteres zu erkennen.

c) Die maximale Inspiration verhält sich dynamisch prinzipiell gleich wie die normale Inspiration, nur dass das Ausmass der initialen Beschleunigungswerte d. h. die Grösse der inspiratorischen Beschleunigung eben grösser sind. Bei der Expiration (max.) besteht gegenüber der normalen Expiration insofern ein Unterschied, dass hier aktive Muskelkräfte von Anfang an dabei sind. Diese erreichen jedoch gegen das Ende dieser Phase, also im Bereich der Reserveluft ihre grösste Intensität; denn sonst wäre diese forcierte Expiration gegen den elastischen Widerstand des Thorax gar nicht möglich. Dadurch wird aber das Ende der Beschleunigungs-Verzögerungskurve in genau gleicher Weise umgebogen wie bei der normalen Expiration.

d) Die unter *a* bis *c* geschilderten Vorgänge sind nicht allein massgebend für den Verlauf der Atembewegung. Sie bedingen wohl die allgemeine Richtung des Kurvenverlaufs. Die feinere Regulierung erfolgt jedoch wie bei jeder aktiven Bewegung durch die Tätigkeit des propriozeptiven Reflexapparates. Das Spiel der Agonisten und Antagonisten erfolgt während der ganzen normalen Inspiration, während im Verlauf der normalen Expiration erst mit dem Einsetzen aktiver Muskelkräfte gegen das Ende dieser Atemphase hin die propriozeptive Steuerung einsetzt. Bei der maximalen Atmung macht sich diese Reflextätigkeit in beiden Atemphasen noch stärker bemerkbar. Hier sind eben grössere Muskelkräfte am Werk, die einer intensiveren reflektorischen Steuerung bedürfen.

e) Neben diesen allgemein gültigen qualitativen Eigenschaften der Beschleunigungs-Verzögerungskurven machen sich noch gewisse quantitative Beziehungen bemerkbar. So folgt bei der ruhigen Atmung, sowohl inspiratorisch wie expiratorisch, auf grosse initiale Beschleunigungswerte ein rascherer Kurvenabfall, als dies bei kleineren initialen Beschleunigungswerten der Fall ist. Diese

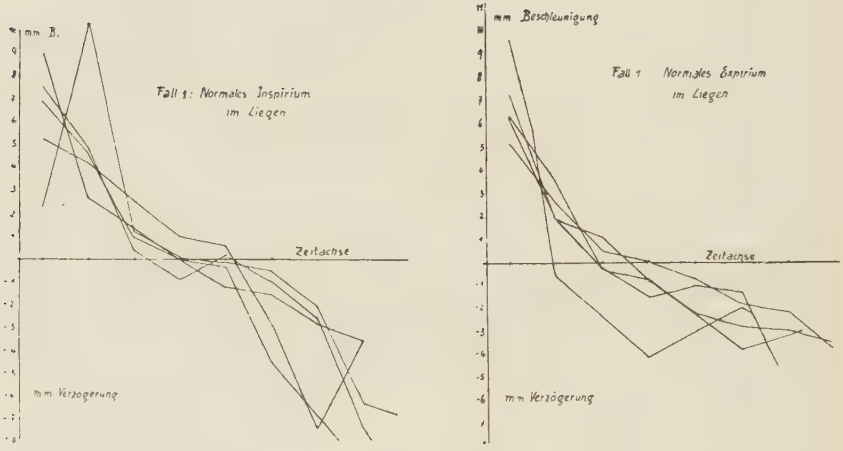
Eigentümlichkeit beruht auf der überragenden Rolle der Strömungswiderstände (quadratisches Ansteigen mit wachsender Atemstromgeschwindigkeit) als Ausgleichsfaktor bei der Atembewegung.

Aus der unter genau den gleichen atemmechanischen Bedingungen gefundenen Variabilität der initialen Beschleunigungswerte lässt sich ja ohne weiteres der Schluss ziehen, dass die Innervationsgrösse von Atemzug zu Atemzug ganz erheblich schwankt. Wenn sich dies nicht in vollem Umfang auf die Atemvolumkurve auswirken kann, sondern trotzdem ein relativ wenig varierendes Atemvolumen zustande kommt, so ist dies nur die Folge der Kompensationswirkung der Strömungswiderstände. Hinter der spirometrischen Kurve (Atemvolumkurve) verbergen sich viele Vorgänge, die erst durch die systematische Analyse des Pneumotachogramms (Atemstromkurve) zum Vorschein gelangen. Das Spirogramm eignet sich deshalb viel schlechter zum Studium der Tätigkeit der atmungsregulierenden Zentren als das Pneumotachogramm, was sich bereits bei den grundliegenden Untersuchungen von Fleisch über die propriozeptive Steuerung der Atembewegung ergeben hat.

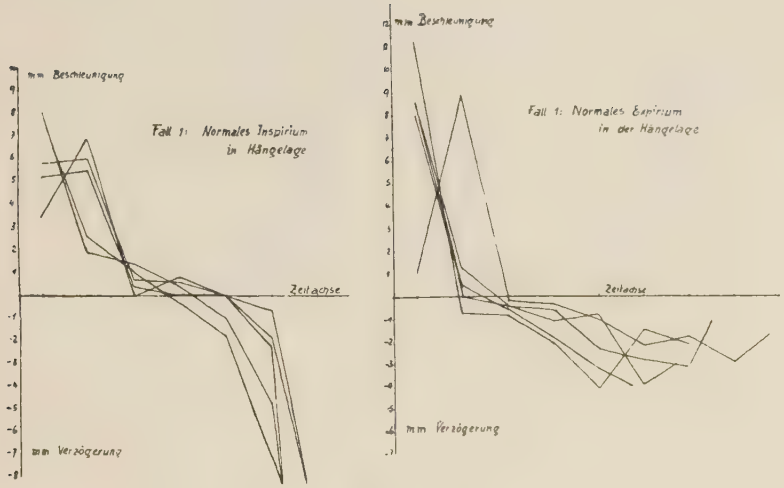
f) Es ist klar, dass bei der dominierenden Rolle des Innervationsmechanismus und unter dem grossen Einfluss der Strömungswiderstände der Verlauf der Beschleunigungs-Verzögerungskurve bei der normalen Atmung von Beginn an bis zu einem gewissen Grad festgelegt ist. Das Vorhandensein von individuellen inspiratorischen und expiratorischen Kurventypen entspricht somit nur einer individuellen Reaktionsweise des Atemzentrums auf einen bestimmten hämatogenen Reiz oder einer besondern konstitutionellen Eigenart des Atmungsapparates, die als individuelle Grösse des Strömungswiderstandes in Erscheinung tritt. Welcher von beiden Faktoren bedeutungsvoller ist, wird sich erst durch weitere Untersuchungen abklären lassen.

g) Die verschiedenen untersuchten Körperlagen stellen in atemmechanischer Hinsicht verschiedene Ansprüche an den Organismus. Zwar wirken sich diese Lagen hauptsächlich auf die Beweglichkeit von Zwerchfell und Thorax aus, d. h. auf die elastischen Widerstände. Da wir nun gesehen haben, dass dieselben einzig

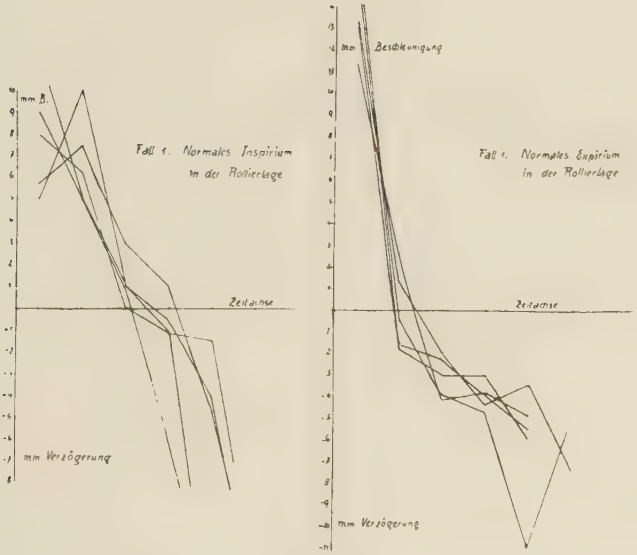
während der normalen Expiration auf den Ablauf der Atembewegung sich wesentlich auswirken, so kann es uns nicht verwundern, dass nur in dieser Phase eine gewisse lagebedingte Orientierung der Dynamik der Atembewegung entstehen kann. In den übrigen Atemphasen (normales Inspirium, maximales In- und Expirium) führen die verschiedenen atemmechanischen Situationen nur zu einer individuellen Veränderung der Atemdynamik.



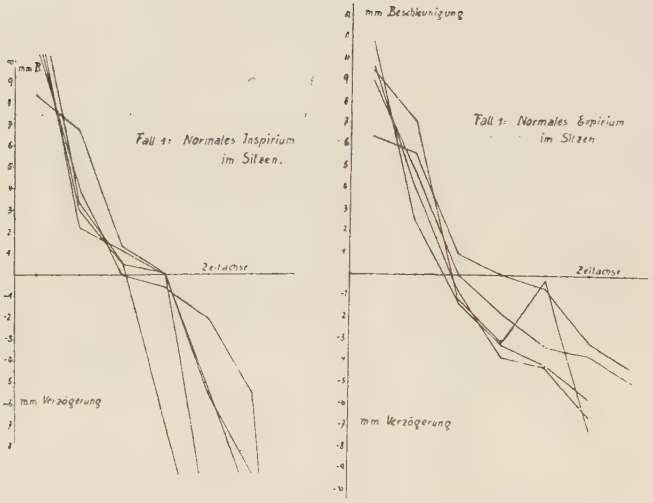
a. **Fig. 2.** *b.*



a. **Fig. 3.** *b.*



a. **Fig. 4.** *b.*



a. **Fig. 5.** *b.*

a. **Fig. 6.** *b.*

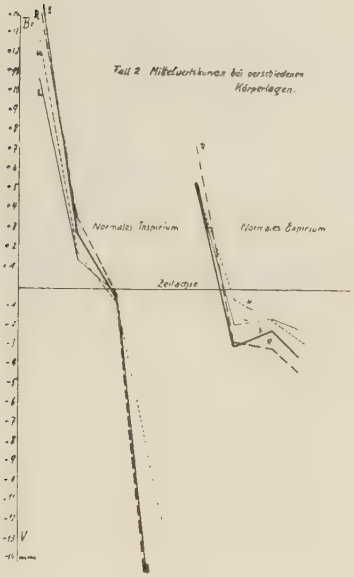

Fall 2 Mittelwertskurven bei verschiedenen Körperlagen.
Normales Inspirium
Normales Exspirium
Zeitachse

Fig. 7.

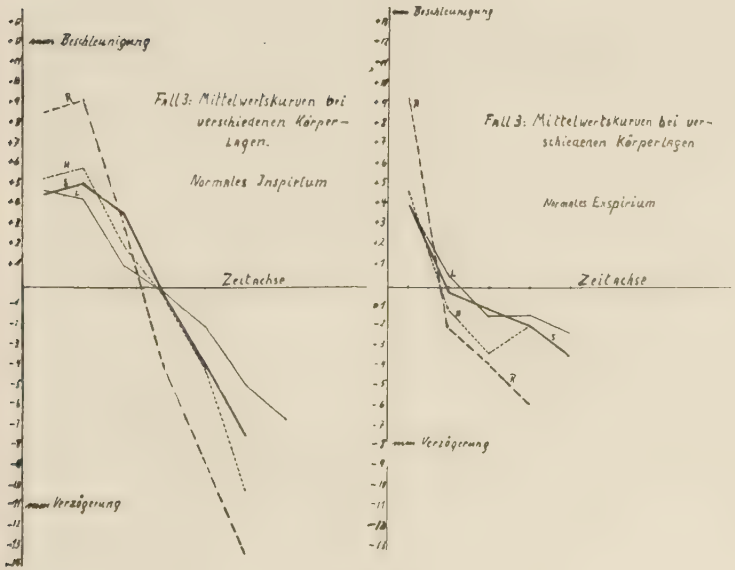

Beschleunigung
Fall 3: Mittelwertskurven bei verschiedenen Körper-Lagen.
Normales Inspirium
Zeitachse
Verzögerung
Beschleunigung
Fall 3: Mittelwertskurven bei verschiedenen Körperlagen
Normales Exspirium
Zeitachse
Verzögerung

Fig. 8.

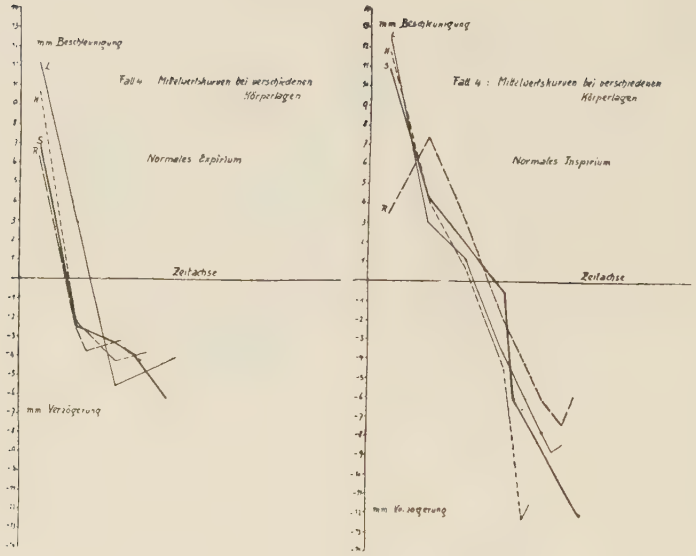

mm Beschleunigung
Fall 4 Mittelwertskurven bei verschiedenen Körperlagen
Normales Exspirium
Zeitachse
mm Verzögerung
mm Beschleunigung
Fall 4 : Mittelwertskurven bei verschiedenen Körperlagen
Normales Inspirium
Zeitachse
mm Verzögerung

Fig. 9.

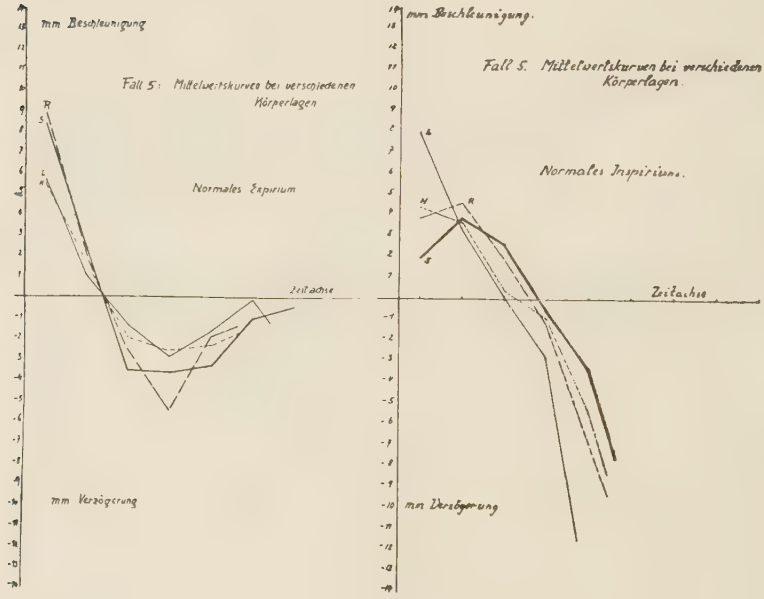

mm Beschleunigung
Fall 5: Mittelwertskurven bei verschiedenen Körperlagen
Normales Exspirium
Zeitachse
mm Verzögerung
mm Beschleunigung.
Fall 5. Mittelwertskurven bei verschiedenen Körperlagen.
Normales Inspirium.
Zeitachse
mm Verzögerung

Fig. 10.

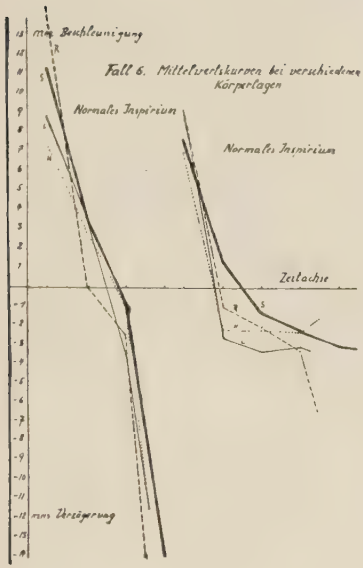


Fig. 11.

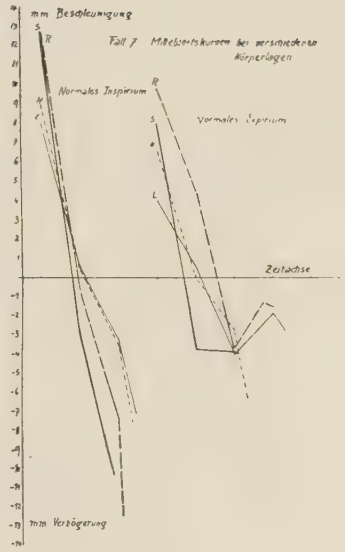
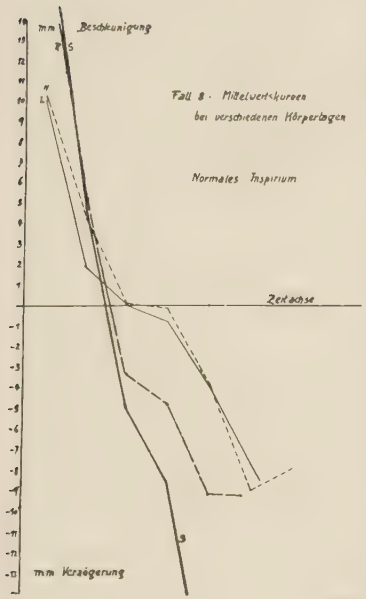


Fig. 12.



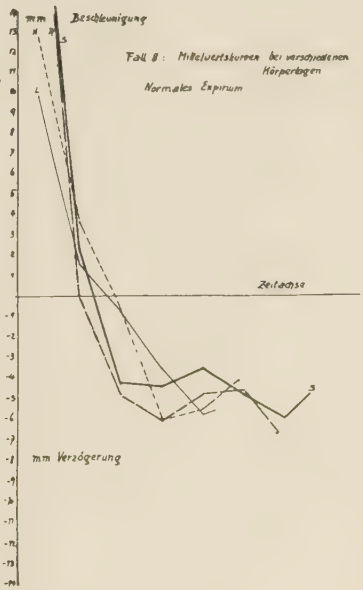


Fig. 13.

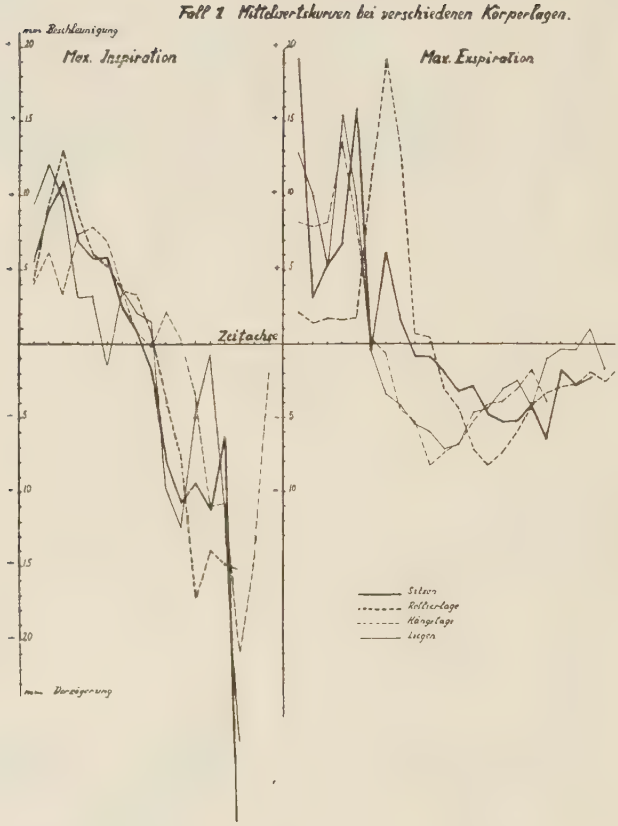

Fall 1 Mittelwertskurven bei verschiedenen Körperlagen.
mm Beschleunigung
Max. Inspiration
Max. Exspiration
Zeitachse
mm Verzögerung
Sitzen
Rückenlage
Hängelage
Liegen

Fig. 14.

Fall 2. Mittelvertikurven bei verschiedenen Körperlagen.

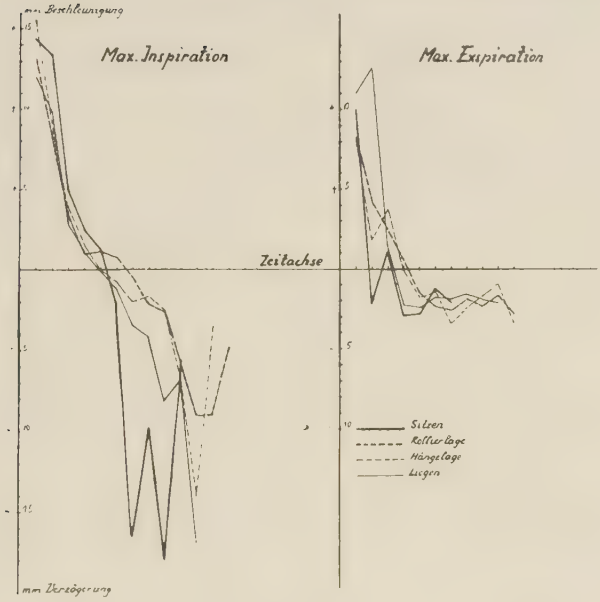


Fig. 15.

Fall 3 Mittelwertskurven bei verschiedenen Körperlagen

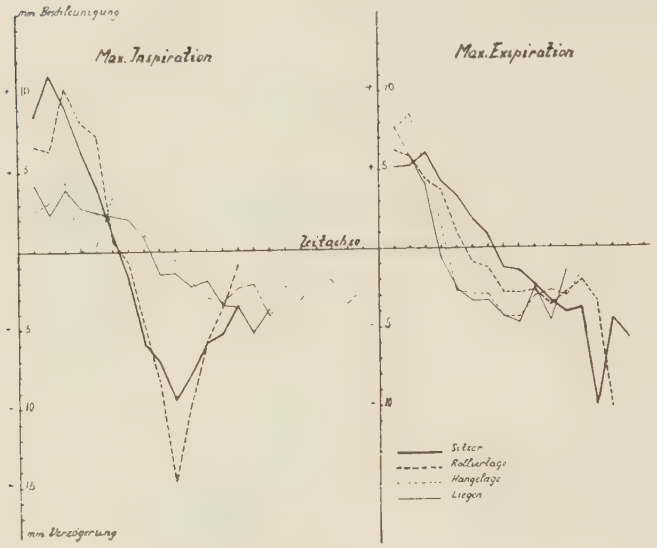


Fig. 16.

Fall 4 Mittelwertskurven bei verschiedenen Körperlagen.

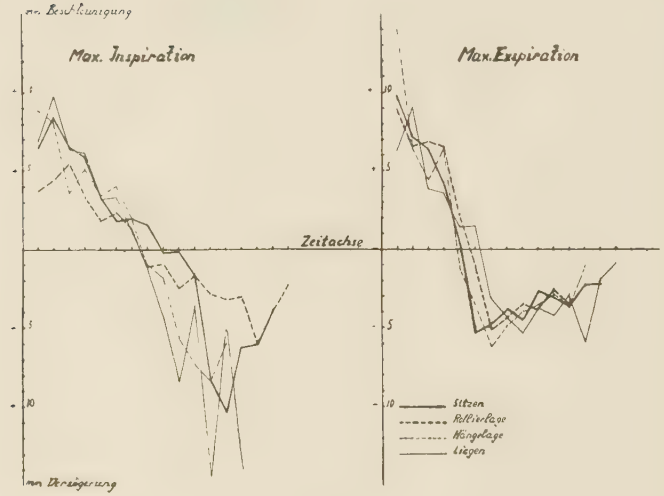


Fig. 17.

LITERATURVERZEICHNIS

ANTHONY, A. J. *Funktionsprüfung der Atmung.* Barth. Leipzig 1937.

FLEISCH, A. *Neuere Ergebnisse über Mechanik und propriozeptive Steuerung der Atembewegung.* Erg. Phys. 36, 249, 1934.

FLEISCH A. und TRIPOD, J. *Zur Analyse der Atmungssteuerung.* Schw. Med. Wschr. 1938, 33, 951.

GUKELBERGER, M. *Die atemphysiologischen Wirkungen der verschiedenen Körperlagen und ihre Bedeutung für die Therapie.* Erscheint demnächst in Erg. der inn. Med. und Kinderheilkunde.

KOHLER, J. *Die Beeinflussung der Lungenvolumina durch verschiedene Körperlagen.* Diss. Bern 1942.

ROHRER, F. *Physiologie der Atembewegung.* Hdb. der normalen und pathologischen Physiologie v. A. Bethe Bergmann u. a. II/70.

RUMPF. *Pneumatographische Studien an Gesunden, Emphysematikern und Herzkranken im Bad.* Z. f. ges. exp. Med. 101, 493-501, 1937.

WEBER, J. *Untersuchungen zur Frage der Konstanz des Pneumotachogramms.* Z. exp. Med. 105, 363-369, 1939.

WITTKOWER, E. *Klinische und Pharmakologische Pneumotachogrammstudien.* Verr. d. dtsch. Ges. f. inn. Med. 389-392, 1927.